

## TOPLU TAŞIMA ARAÇLARINDA SİYAH KARBON MARUZİYETİNİN BELİRLENMESİ

Burcu UZUN<sup>1</sup>(\*), Burcu ONAT<sup>1</sup>, Özcan AKIN<sup>1</sup>, Ülkü ALVER ŞAHİN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Avcılar/İstanbul

### ÖZET

Siyah karbon (SK), ince partiküllerin bir bileşeni olup eksik yanma sonucu atmosfere doğrudan verilen bir hava kirleticidir. Ana yollarda SK'nın birincil kaynağı trafiktir. Nüfusun ve taşıt sayısının fazla olduğu metropol şehirlerde yolcular gün içindeki SK maruziyetlerinin yaklaşık %30'unu trafikte seyahat esnasında alırlar.

Bu çalışmada altı farklı taşıt türünde (otobüs, metrobüs, metro, deniz otobüsü, feribot ve özel araç) yolcuların maruz kaldığı SK konsantrasyonları taşıt içinde ve dış ortamda (durak, peron, rıhtım) MicroAeth AE51 model SK monitörü ile ölçülmüş ve ortalama SK konsantrasyonları, seyahat süresince maruz kalınan doz miktarları, trafiğin yoğun olduğu ve az yoğun olduğu saatler gibi faktörler dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ölçümler Haziran 2016-Mayıs 2017 tarihleri arasında yapılmıştır. Farklı ulaşım türlerinde gözlenen en düşük ortalama SK konsantrasyonu feribotta ve özel araç içerisinde cam kapalı seyir halinde iken  $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en yüksek SK konsantrasyonu ise özel araç içerisinde cam açık seyir halinde iken  $18,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak tespit edilmiştir. Otobüs ve metrobüsdeki ortalama SK konsantrasyonlarının  $8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değiştiği görülmüştür. Deniz otobüsünde de ortalama SK konsantrasyonunun metro ve feribota göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Özel araç içinde camlar açık seyir halinde iken ölçülen SK maruziyet dozunun ( $7,3 \pm 5,5 \mu\text{g}$ ) en yüksek değeri aldığı görülmüştür. En düşük SK maruziyet dozu seyahat süresinin kısa olduğu M2 metro hattında  $0,8 \pm 0,6 \mu\text{g}$  olarak hesaplanmıştır. Araçların dış ortamlarında yapılan ölçümlerde en yüksek SK ortalama konsantrasyonu Bostancı rıhtımında yapılan ölçümlerde  $24,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak tespit edilmiştir. En düşük SK ortalama konsantrasyonu ise M2 metrosu Hacıosman peronunda  $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak bulunmuştur. Trafik yoğunluğu ve SK konsantrasyonları arasındaki ilişkiye bakıldığında 76B ve özel araç (cam kapalı) hariç tüm ulaşım türlerinde ölçülen trafiğin yoğun olduğu saatlerdeki konsantrasyonların yoğun olmadığı konsantrasyonlardan daha yüksek olduğu görülmüştür.

### ANAHTAR SÖZCÜKLER

Toplu taşıma araçları, siyah karbon, maruziyet

### ABSTRACT

Black carbon (BC), a component of fine particles, is an air pollutant that is supplied directly to the atmosphere from incomplete combustion. The primary source of BC is traffic on main roads. In

(\*) brcuzn85@gmail.com

metropolitan cities with a large number of population and vehicles, passengers take about 30% of BC exposures during the day when traveling on the road.

A study on a commuter's exposure to BC in six different traffic modes (bus, metrobus, subway, seabus, ferry and car) was conducted in Istanbul. A commuter's real-time exposure concentrations were recorded by MicroAeth AE51 BC monitors, and the average BC exposure concentration and inhalation dose for peak hour and off-peak hour of traffic were analyzed. Measurements were made between June 2016 and May 2017. The lowest average BC concentration was found as  $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  while the windows closed, the highest average BC concentration was found as  $18,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  while the windows was open in car. The average BC concentrations were varied between  $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in bus and metrobus. The average BC concentration of seabus was found higher than subway and ferry. It was observed that the measured highest inhalation dose ( $7.3 \pm 5.5 \mu\text{g}$ ) was during the windows was open in car. The lowest average BC concentration was calculated  $0.8 \pm 0.6 \mu\text{g}$  on the M2 subway line which shortest travel time. The highest average BC concentration was determined  $24.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Bostancı dock measurements. The lowest average BC concentration was found as  $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in the Hacıosman platform of M2 subway line. Looking at the relationship between traffic intensity and BC concentrations, it was seen that the measured concentrations in peak hours except 76B and in car (windows closed) were higher than that of off-peak hours in all types of transport.

## KEYWORDS

Public transport, black carbon, exposure

## 1. GİRİŞ

Siyah karbon (SK), tamamlanmamış yanma sonucu,  $0.001$  ile  $0.005 \mu\text{m}$  arasında değişen küçük küreler ve daha büyük boyuttaki parçacıkların ( $0.1-1 \mu\text{m}$ ) birleşmesi ile oluşan birincil bir parçacıktır (EPA, 2010). Literatürde yapılan çalışmalarda SK ile ilişkili sağlık sonuçları arasında kardiyovasküler etkiler (Adar vd., 2007; McCracken vd., 2010; Wellenius vd., 2012), solunum yolu etkileri (Lin vd., 2011; Patel vd., 2010) ve mortalite (Gan vd., 2011) yer almaktadır. SK, solunum yolu hastalıkları ve akciğer kanseri dahil olmak üzere insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Fann vd., 2012). Bununla birlikte solar radyasyonu absorplayıcı özellik gösterdiğinden dolayı küresel ısınmaya katkıda (yaklaşık  $+1,1 \text{ W m}^{-2}$ ) bulunmaktadır (Bond vd., 2013).

SK'nın şehirlerde başlıca kaynağı ulaşımdır, toplam SK emisyonun yaklaşık %67'sinin dizel motor egzozu, yaklaşık %20'sinin benzinli araç egzozundan kaynaklandığı belirtilmektedir. Kısa süreli de olsa ulaşım sırasındaki maruziyet günlük siyah karbon maruziyetinin önemli bir parçasıdır. Belçika'da yapılan kişisel maruziyet çalışmasında, ulaşımdaki SK konsantrasyonlarının, evdeki konsantrasyonlara kıyasla 2 ila 5 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur (Dons vd., 2011, 2012). Kişisel maruz kalma konsantrasyonlarının yanında, vücuda inhale edilen kirlenici maddelerin miktarı, değişken maruziyet konsantrasyonları, inhalasyon oranları, belirli bir mikro ortamdaki süre, yaş ve vücut kütlesi gibi bir dizi biyolojik faktör nedeniyle değişkendir. (Rodes vd., 2012). Kaur ve arkadaşları (2017), ulaşımda SK düzeylerine kişisel faktörler, ulaşım modları, trafik faktörleri ve meteorolojik faktörler olmak üzere dört faktörün katkıda bulunabileceğini

belirtmişlerdir (Kaur vd., 2007). Son yıllarda ulaşım türü ve çevresel değişkenler dikkate alınarak kişisel SK maruziyet ölçümleri ulaşım araçlarında yapılmıştır (Dons vd, 2012; Li vd, 2015; Moreno vd., 2015; Ryan vd., 2016 ; Rivas vd., 2017). Aynı zamanda, seyahat maruziyetleri üzerine yapılan çalışmalarda solunan hava kirliliğine ilişkin değerlendirmeler de yapılmıştır (Int Panis vd., 2010; McNabola vd., 2008; O'Donoghue vd., 2007; Zuurbier vd., 2010, de Nazelle vd., 2012, Li vd., 2015).

Bu çalışmada İstanbul'da gün içinde seyahat amacıyla kullanılan altı farklı taşıt türünde (otobüs, metrobüs, metro, özel araç, deniz otobüsü ve feribot) SK konsantrasyonlarının ölçümü Haziran 2016-Mayıs 2017 tarihleri arasında yapılmıştır ve ortalama SK konsantrasyonları ve seyahat süresince maruz kalınan doz miktarları, trafiğin yoğun olduğu ve az yoğun olduğu saatler gibi faktörler dikkate alınarak analiz edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada İstanbul'da kişilerin gün içinde seyahat amacıyla kullandıkları toplu taşıma araçlarında maruz kaldıkları ortalama SK konsantrasyonları, seyahat süresince maruz kalınan doz miktarları, trafiğin yoğun olduğu ve az yoğun olduğu saatler gibi faktörler dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ölçümler otobüs, metrobüs, metro, otomobil, deniz otobüsü ve feribot olmak üzere altı farklı ulaşım türünde Haziran 2016 – Mayıs 2017 tarihleri arasında araç içinde ve dış ortamda (durak,peron, rıhtım) gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler, SPSS programı (sürüm 20.0) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 1' de saha çalışmasında tercih edilen ulaşım türleri ve güzergah özellikleri gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Saha Çalışmasında Kullanılan Ulaşım Türleri ve Özellikleri

Ulaşım Türü	Güzergah	Uzunluk	Durak sayısı	Yaklaşık seyahat süresi (gidiş-dönüş)	Ölçüm sıklığı
Otobüs	146 Bakırköy-Boğazköy Mahallesi	40 km	48	150 dk	1 gün/ay
	76B Bakırköy-Cihangir Mahallesi	20 km	39	130 dk	2 gün/ay
Metrobüs	34 Avcılar-Zincirlikuyu	30 km	26	120 dk	2 gün/ay
	34AS Avcılar-Söğütluçeşme	42km	33	170 dk	2 gün/ay
Metro	M1-Yenikapı-Atatürk Havalimanı (hafif raylı sistem)	26,1 km	23	70 dk	1 gün/ay
	M2- Yenikapı-Hacıosman	23,5 km	16	66 dk	1 gün/ay
	M4- Kadıköy-Tavşantepe	26,5 km	19	77 dk	1 gün/ay
Otomobil	Avcılar- Zincirlikuyu	30 km	-	100 dk	2 gün/ay
Deniz otobüsü	Bakırköy-Bostancı	20 km	3	100 dk	2 gün/ay
Feribot	Yenikapı-Yalova	50 km	-	150 dk	1 gün/ay

Bir ulaşım türünde gerçekleştirilen ölçüm çalışmasında öncelikle güzergahın ilk durağında aracın dış ortamında (durak, rıhtım, peron) 15 dk süre ile ölçüm yapılmıştır. Daha sonra araca binerek araç içi ölçüme güzergahın son durağına kadar devam edilmiştir. Araçtan indikten sonra son durakta aracın dış ortamında (durak, rıhtım, peron) 15 dk süre ile ölçüm yapılmıştır. Tekrar araca

binerek güzergahın dönüş yönünde ölçüme devam edilmiştir. Dönüş yolundaki seyahat tamamlandıktan sonra aracın dış ortamında 15 dk süre ile ölçüm yapılmıştır. Sabah ilk ölçüm çalışması (gidiş-dönüş) tamamlandıktan sonra aynı hatta tekrar ölçüm çalışması yapılmıştır. Özel araç ölçümleri cam kapalı cam açık seyir halinde olmak üzere iki durum için gerçekleştirilmiştir. Cam kapalı durumda iken klima iç sirkülasyon halinde ölçümler yapılmıştır.

### 2.1. Siyah karbon ölçümü

Siyah karbon ölçümleri optik yöntemle ölçüm yapabilen MicroAeth-AE51 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada trafik ve ulaşım etkilerini görebilmek için ölçüm periyodu 10 saniyede bir ve pompa çekiş hızı 100 ml/dk olarak ayarlanmıştır. SK ölçümü için filtre esaslı ışık emme yöntemleri, "yüklenme etkisi" nden etkilenmektedir; filtrenin aerosol yüklemesi arttıkça cihazın SK seviyeleri orantılı olarak azalmaktadır. Bu çalışmada bu etki, Kirchstetter ve Novakov'un aşağıdaki K-N olarak adlandırılan ampirik ilişkisi kullanarak optimize edilmiştir:

$$BC=BC_0/(0,88Tr+0,12) \quad (1)$$

Bu denklemde 'BC' düzeltilmiş siyah karbon konsantrasyonu, 'BC<sub>0</sub>' ise düzeltilmemiş konsantrasyondur. Formüldeki Tr katsayısı aethalometrenin filtre iletim değeri olup

$$Tr = \exp (-ATN / 100) \quad (2)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. ATN değeri ise her ölçüm için aethalometre tarafından belirlenen bir katsayıdır. Bu düzeltme algoritması tüm SK ölçümlerine uygulanmıştır (Kirchstetter ve Novakov, 2007).

### 2.2. Siyah karbon maruziyet hesabı

Maruziyet dozu hesabında Li ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan metodoloji uygulanmıştır. Maruziyet dozu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Li vd., 2015):

$$D = C_{BC} \cdot IR_{(\Delta t)} \cdot \Delta t \quad (3)$$

Burada; 'D' ortalama maruziyet dozu ( $\mu\text{g}$ ), 'C<sub>BC</sub>' belirli bir mikro ortamda ortalama bir SK konsantrasyonu veya  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük bir yolculuk, 'IR' ( $\Delta t$ ) solunum oranı ( $\text{m}^3/\text{saat}$ ) ve ' $\Delta t$ ' yolculuk sırasında insanların kirleticilere maruz kalma süresini (saat) göstermektedir. Solunum oranları, Wang vd., (2009) tarafından kabul edilmiş katsayılar kullanılmıştır. Solunum oranları 20-45 yaş arasındaki gruplar için otururken veya ayakta iken (örneğin metroda veya taksi beklerken)  $0,47 \text{ m}^3/\text{saat}$ , yürüme sırasında  $0,63 \text{ m}^3/\text{saat}$  ve bisiklet süresince  $0,70 \text{ m}^3/\text{saat}$  olarak kabul edilmiştir (Wang vd., 2009).

### 2.3. İstatistiksel analiz

Toplu taşıma araçları içinde ölçülen SK konsantrasyonları, trafiğin yoğun olduğu saatler (09:00-11:00 ve 14:00-18:00) ve trafiğin az yoğun olduğu saatler (11:00-14:00) için analiz edilmiştir. İstatistiksel analizler, SPSS programı (sürüm 20.0) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri dağılımını karakterize etmek için aritmetik ortalama, medyan ve standart sapma kullanılmıştır. Verileri karşılaştırmak için t-testi kullanılmıştır ve anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ 'tir.

### 3.SONUÇLAR

Ulaşım araçları içinde ölçülen SK konsantrasyonlarının ortalama, standart sapma ve medyan değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Dış ortamda (durak, peron, rıhtım) ölçülen SK konsantrasyonlarının ortalama, standart sapma ve medyan değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Ulaşım araçları içinde ölçülen SK değerleri ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Ulaşım Türü		Ortalama	Standart Sapma	Medyan
Otobüs	146	10,9	10,1	8,0
	76B	11,1	8,4	9,0
Metrobüs	34	10,5	5,9	9,7
	34AS	8,6	6,0	7,7
Metro	M1	5,0	2,8	4,6
	M2	3,0	2,4	2,3
	M4	7,8	5,8	3,6
Otomobil	Cam Açık	18,7	14,1	15,0
	Cam Kapalı	2,2	2,1	1,7
Deniz otobüsü		8,0	9,1	5,4
Feribot		2,2	3,0	0,9

Farklı ulaşım türlerinde gözlenen en düşük ortalama SK konsantrasyonu feribotta ve özel araç içerisinde cam kapalı seyir halinde iken  $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en yüksek SK konsantrasyonu ise özel araç içerisinde cam açık seyir halinde iken  $18,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak tespit edilmiştir. Otobüs ve metrobüsdeki ortalama SK konsantrasyonlarının  $8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değiştiği görülmüştür. Deniz otobüsünde de ortalama SK konsantrasyonunun metro ve feribota göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Özel araç içinde camlar açık seyir halinde iken ölçülen SK konsantrasyonunun camlar kapalı klima iç sirkülasyon halinde iken ölçülen SK’den daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Dış ortamda (durak, peron, rıhtım) ölçülen SK değerleri ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

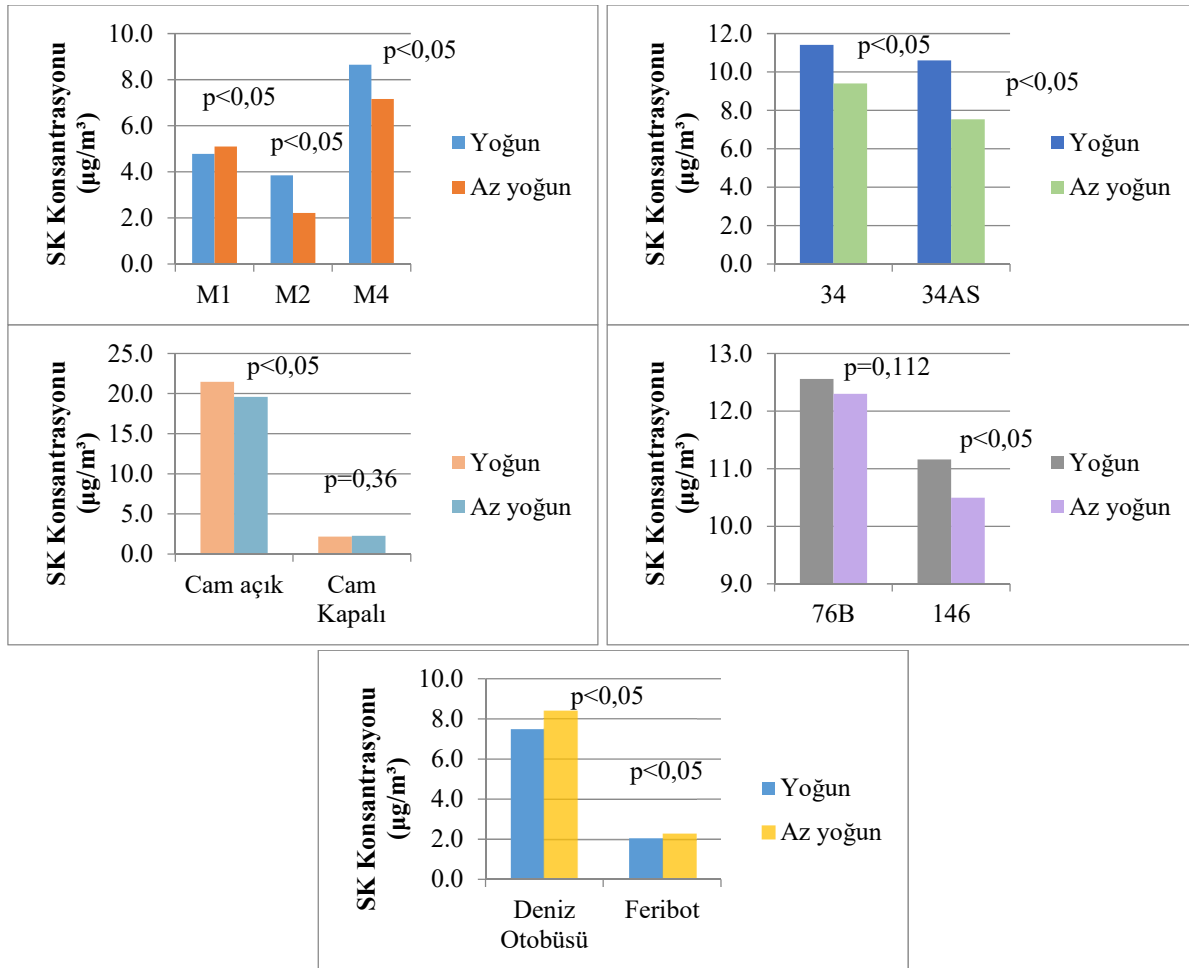
Dış Ortam	Ortalama	Standart Sapma	Medyan
Yenikapı Rıhtım	13,7	22,5	5,3
Yalova Rıhtım	18,5	19,5	11,7
Bakırköy Rıhtım	8,3	13,2	3,6
Bostancı Rıhtım	24,5	47,4	4,7
Boğazköy Mah. Otobüs Durağı	5,5	10,4	2,2
Cihangir Mah. Otobüs Durağı	4,6	4,2	3,5
Bakırköy Otobüs Durağı	8,7	10,4	5,4
Söğütlüçeşme Metrobüs Durağı	4,7	4,8	3,6
Avcılar Metrobüs Durağı	12,4	11,6	9,6
Zincirlikuyu Metrobüs Durağı	9,8	8,0	7,9
Yenikapı Peron1	4,6	2,6	4,1
Atatürk Havalimanı Peron	4,5	2,7	3,9
Yenikapı Peron2	4,2	3,8	2,0
Hacıosman Peron	3,3	2,6	2,0
Kadıköy Peron	5,0	4,0	4,1
Taşaantepe Peron	10,1	6,1	9,9

Yenikapı Peron1; M1 Yenikapı Peronu, Yenikapı Peron2; M2 Yenikapı Peronu.

Araçların dış ortamlarında yapılan ölçümlerde en yüksek SK ortalama konsantrasyonu Bostancı rıhtımında yapılan ölçümlerde  $24,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak tespit edilmiştir. En düşük SK ortalama konsantrasyonu ise M2 metrosu Hacıosman durağı peronunda  $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak bulunmuştur.

### 3.1. Trafik yoğunluğu

Toplu taşıma araçlarının SK ölçümlerinin trafik yoğunluğuna göre ortalama farklılıkları Şekil 1’de verilmiştir.



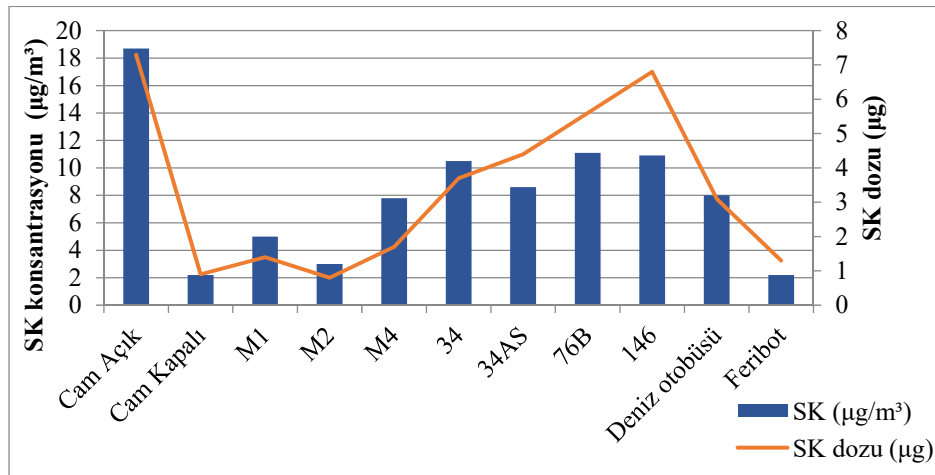
Şekil 1. Toplu taşıma araçlarının SK ölçümlerinin trafik yoğunluğuna göre ortalama farklılıkları

Şekil 1’e göre metro (M2 ve M4), metrobüs (34,34as), otobüs (146) ve özel araç (cam açık) içinde ölçülen trafiğin yoğun olduğu saatlerdeki konsantrasyonlar yoğun olmadığı konsantrasyonlardan istatistiksel olarak %95 anlamlı daha yüksektir. Diğer araç türlerinden farklı olarak M1 metrosu, deniz otobüsü ve feribot içinde ölçülen trafiğin az yoğun olduğu saatlerdeki konsantrasyonlar, trafiğin yoğun olduğu konsantrasyonlardan istatistiksel olarak %95 anlamlı daha yüksektir. Özel araç içerisinde cam kapalı seyir halinde iken ve 76b otobüs hattında trafiğin yoğun olduğu saatler

ve az yoğun olduğu saatlerde ölçülen ortalama değerlerinin ise anlamlı bir farklılık göstermediği hesaplanmıştır ( $p>0,05$ ).

### 3.2. Siyah karbon maruziyet dozu

Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanan en yüksek maruziyet dozu özel araç içerisinde cam açık seyir halinde iken  $7,3\pm 5,5$   $\mu\text{g}$  olarak hesaplanmıştır. En düşük maruziyet dozu ise M2 metro hattında  $0,8\pm 0,6$   $\mu\text{g}$  olarak hesaplanmıştır. Diğer ulaşım türleri için sırasıyla M1 ( $1,4\pm 0,8$   $\mu\text{g}$ ), M4 ( $2,3\pm 1,7$   $\mu\text{g}$ ), 34 ( $3,7\pm 2,1$   $\mu\text{g}$ ), 34AS ( $4,4\pm 3,0$   $\mu\text{g}$ ), 76B ( $5,6\pm 4,3$   $\mu\text{g}$ ), 146 ( $6,8\pm 6,3$   $\mu\text{g}$ ), deniz otobüsü ( $3,1\pm 3,5$   $\mu\text{g}$ ), feribot ( $1,3\pm 1,8$   $\mu\text{g}$ ) ve özel araçta cam kapalı seyir halinde iken ( $0,9\pm 0,8$   $\mu\text{g}$ ) olarak hesaplanmıştır.



Özel araç; Cam Açık, Cam Kapalı

Şekil 2. Farklı ulaşım türlerinde ortalama SK konsantrasyonları ve inhalasyon dozları

Şekil 2’de SK maruziyet konsantrasyonları ve maruziyet dozu karşılaştırıldığında, SK’ya en düşük ve en yüksek özel araç içerisinde cam kapalı ve cam açık seyir halinde iken maruz kalan bireyin aynı zamanda en düşük ve en yüksek maruziyet dozuna sahip olduğu görülmüştür. Dış ortamda yapılan ölçümlerde en yüksek maruziyet dozu Bostancı rıhtımında  $2,9\pm 5,6$   $\mu\text{g}$  ve en düşük maruziyet dozu Hacıosman peronunda  $0,4\pm 0,3$   $\mu\text{g}$  ölçülmüştür. Diğer dış ortamlarda maruziyet dozu sırasıyla Yenikapı rıhtım ( $1,6\pm 2,6$ ), Yalova rıhtım ( $2,2\pm 2,3$ ), Bakırköy rıhtım ( $0,9\pm 1,6$ ), Boğazköy Mahallesi otobüs durağı ( $0,6\pm 1,2$ ), Cihangir Mahallesi otobüs durağı ( $0,5\pm 0,5$ ), Bakırköy otobüs durağı ( $1,0\pm 1,2$ ), Söğütlüçeşme metrobüs durağı ( $0,6\pm 0,6$ ), Avcılar metrobüs durağı ( $1,5\pm 1,4$ ), Zincirlikuyu metrobüs durağı ( $1,2\pm 0,9$ ), Yenikapı peron1 ( $0,5\pm 0,3$ ), Atatürk Havalimanı peronu ( $0,5\pm 0,3$ ), Yenikapı peron2 ( $0,5\pm 0,4$ ), Kadıköy Peron ( $0,6\pm 0,5$ ) ve Tavşantepe Peronda ( $1,2\pm 0,7$ ) olarak hesaplanmıştır.

## 4. SONUÇ DEĞERLENDİRME

Kişisel ortalama SK maruziyet konsantrasyonları küçükten büyüğe doğru özel araç (cam kapalı) = feribot < M2 < M1 < M4 < deniz otobüsü < 34AS < 34 < 146 < 76B < özel araç (cam açık) olarak sıralanmıştır. Otobüs ve metrobüsdeki ortalama SK konsantrasyonlarının  $8,6$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $11,1$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değiştiği görülmüştür. Deniz otobüsünde de ortalama SK konsantrasyonunun metro ve

feribota göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Özel araç içinde camlar açık seyir halinde iken ölçülen SK konsantrasyonunun camlar kapalı klima iç sirkülasyon halinde iken ölçülen SK'dan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada olduğu gibi bazı çalışmalarda yolcuların en yüksek maruziyete araba ile gidiş sırasında kaldıkları belirlenmiştir. (De Nazelle et al., 2012; Adams et al., 2002; Dons et al., 2012; Zuurbier et al., 2010).

Maruziyet dozları küçükten büyüğe doğru M2<özel araç(cam kapalı)<feribot<M1<M4<deniz otobüsü<34<34AS<76B<146<özel araç (cam açık) olarak sıralanmıştır. En düşük maruziyet dozu M2 metro hattında hesaplanmıştır. M2 metro hattı en kısa seyahat süresine sahip olan hattır. 146 ve 34AS hatlarında ortalama SK maruziyet konsantrasyonu seyahat süresi daha kısa olan 76B ve 34 hatlarına göre daha düşük olmasına rağmen maruziyet dozu daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, uzun otobüs ve metrobüs hatlarında geçen zamanın diğer kısa olan hatlardan çok daha fazla olmasıdır. En yüksek maruziyet dozu ise özel araç içerisinde cam açık seyir halinde iken hesaplanmıştır. Diğer ulaşım türleriyle karşılaştırıldığında cam açıkken özel aracın ortalama SK maruziyet konsantrasyonları araç içinin dış ortamdaki trafik yoğunluğundan doğrudan etkilenmesi sebebiyle daha yüksek çıkmıştır. Li ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmada en yüksek maruziyet dozu yürüme sırasında  $1.58 \pm 0.29 \mu\text{g}$  hesaplanmıştır. Otobüs, bisiklet ve metro için sırasıyla  $1,50 \pm 0,39 \mu\text{g}$ ,  $1,36 \pm 0,37 \mu\text{g}$  ve  $0,95 \pm 0,29 \mu\text{g}$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkılarak maruziyet dozu hesabında ulaşımda geçen seyahat süresinin ve maruz kalma konsantrasyonunun etkisi olduğu belirtilmiştir (Li vd., 2015). Aynı zamanda SK maruziyet konsantrasyonu ve maruziyet dozu karşılaştırıldığında, SK'ya en düşük ve en yüksek özel araç içerisinde cam kapalı ve cam açık seyir halinde iken maruz kalan bireyin aynı zamanda en düşük ve en yüksek maruziyet dozuna sahip olduğu görülmüştür.

Trafik yoğunluğu ve SK konsantrasyonları arasındaki ilişkiye bakıldığında metro (M2 ve M4), metrobüs (34,34as), otobüs (146) ve özel araç (cam açık) içinde ölçülen trafiğin yoğun olduğu saatlerdeki konsantrasyonların yoğun olmadığı konsantrasyonlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Özel araç içerisinde cam kapalı seyir halinde iken ve 76b otobüs hattında trafiğin yoğun olduğu saatler ve az yoğun olduğu saatlerde ölçülen ortalama değerlerinin ise anlamlı bir farklılık göstermediği hesaplanmıştır ( $p>0,05$ ). Maruziyet üzerine yapılan çalışmalarda, yolcuların trafik yoğunluğundan önemli derecede etkilendiği ve özel araç içerisindeki hava kirletici konsantrasyonun çoğunlukla ortamdaki hava kirletici konsantrasyonuna ve otomobillerde kullanılan havalandırma seçimine bağlı olduğu belirtilmiştir (Geiss ve diğerleri, 2010; Cattaneo ve diğerleri, 2009; Briggs ve diğerleri, 2008; Diapouli ve diğerleri, 2008; Rank ve diğerleri, 2001). Dons ve arkadaşları (2012,2013), trafiğin yoğun olduğu saatlerde araç içerisindeki SK konsantrasyonlarının ortalamadan  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Dons vd., 2012,2013). Diğer araç türlerinden farklı olarak M1 metrosu, deniz otobüsü ve feribot içinde ölçülen trafiğin az yoğun olduğu saatlerdeki konsantrasyonlar, trafiğin yoğun olduğu konsantrasyonlardan daha yüksektir. Deniz ulaşımının trafiğin yoğun olduğu yerlerden uzak olması bu farklılığın sebebinin oluşturabilir.

Dış ortam ölçümlerinde bakıldığında rıhtımlardaki ortalama SK konsantrasyonların  $8,3-24,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değiştiği görülmektedir. Deniz otobüsü egzoz emisyonlarının rıhtımda SK konsantrasyon değerlerinin yüksek çıkmasında etkili olduğu söylenebilir. Söğütlüçeşme metrobüs durağına göre yüksek konsantrasyonların gözlemlendiği Avcılar metrobüs durağı ve Zincirlikuyu metrobüs durağı



gün boyunca trafik yoğunluğunun olduğu bir konumdadır ve bu yüksek konsantrasyonlara yoğun trafikten kaynaklanan kirleticilerin birikmesinin neden olduğu söylenebilir. Otobüs duraklarında ise en yüksek ortalama SK konsantrasyonu Bakırköy otobüs durağında görülmektedir. Bakırköy otobüs durağı ana durak olma özelliği gösterdiğinden ve daha fazla araç giriş çıkışı olan bir alan olmasından dolayı yüksek konsantrasyonlara sahip olduğu söylenebilir. Sonuçlara bakıldığında dış ortamda ölçülen konsantrasyonların güzergahlar arasında farklılık gösterdiği ve trafik yoğunluğunun fazla olduğu yollardaki duraklarda yüksek SK konsantrasyonları ve maruziyet dozlarının gözlemlendiği söylenebilir. Tablo 4’de literatürde farklı ulaşım türlerinde yapılmış çalışmalarda belirlenmiş SK konsantrasyon değerleri ile bu çalışmada elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır.

**Tablo 4.** Ulaşım araçlarında yapılmış çalışmalarda SK konsantrasyonları ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	Özel araç	Otobüs	Metrobüs	Metro	Deniz Otobüsü	Feribot
Arnhem (Zuubier vd., 2010)	8,0 (dizel) 9,0 (benzin)	9,0 (dizel) 5,0 (elektrik)	-	-	-	-
Shanghai, (Li vd., 2015)	-	8,66	-	10,96	-	-
Barcelona, (Moreno vd., 2015)	-	5,5	-	7,0	-	-
Queensland (Ryan vd.,2016)	4,4 1,7 (cam kapalı)	2,4	-	-	-	-
London,(Riva s vd., 2017)	4,4*	5,6*	-	-	-	-
Bu Çalışma	18,7 (cam açık) 2,2 (cam kapalı)	11,1 (76B) 10,9 (146)	10,5 (34) 8,6 (34AS)	5,0 (M1) 3,0 (M2) 7,8 (M4)	8,0	2,2

\* Overall (medyan)

Literatürde metrobüs, deniz otobüsü ve feribotta yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Özel araç içinde yapılan çalışmalarda tespit edilmiş SK konsantrasyonlarının farklılık gösterdiği ancak literatürde özel araç içinde cam kapalı durumdaki SK konsantrasyonlarının bu çalışmadaki SK konsantrasyonları ile oldukça benzerlik gösterdiği görülmektedir. Aynı şekilde bu çalışmada metroda tespit edilen SK konsantrasyonları literatürdeki değerlere yakın ve daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Literatürde otobüslerde belirlenmiş SK değerlerine bakıldığında konsantrasyonların değişkenlik gösterdiği, bu çalışmada tespit edilen değerlere yakın ve daha düşük konsantrasyonlar olduğu görülmektedir.

## 5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada İstanbul'da kişilerin gün içinde seyahat amacıyla kullandıkları toplu taşıma araçlarında maruz kaldıkları ortalama SK konsantrasyonları, seyahat süresince maruz kalınan dozu miktarları, trafiğin yoğun olduğu ve az yoğun olduğu saatler gibi faktörler dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ulaşım araçlarında maruz kalınan SK konsantrasyonu ve maruziyet dozu her ulaşım türüne göre değişiklik göstermiştir. En yüksek ortalama SK maruziyet konsantrasyonu ve maruziyet dozu özel araç içerisinde cam açık seyir halinde iken tespit edilmiştir. Özel araç sürücülerinin yüksek SK konsantrasyonuna ve maruziyet dozuna sahip oldukları söylenebilir. En düşük maruziyet dozu seyahat süresinin kısa olduğu ulaşım türlerinde hesaplanmıştır. Uzun otobüs ve metrobüs hatlarında geçen zamanın fazla olmasından dolayı daha yüksek maruziyet dozuna sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlarda maruziyet dozu hesabında ulaşımda geçen seyahat süresinin ve maruz kalınan konsantrasyonunun etkisi olduğu söylenebilir.

Trafik yoğunluğu ve SK konsantrasyonları arasındaki ilişkiye bakıldığında metro (M2 ve M4), metrobüs (34,34as), otobüs (146) ve özel araç (cam açık) içinde ölçülen trafiğin yoğun olduğu saatlerdeki konsantrasyonların yoğun olmadığı konsantrasyonlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Yolcuların trafik yoğunluğundan önemli derecede etkilendiği söylenebilir. Dolayısıyla, özel araç ile seyir halindeyken ve toplu taşıma araçlarında yolcuların maruz kaldıkları SK seviyeleri, seçilen güzergaha bağlı olacaktır çünkü yoğun trafiğin olduğu caddelerde diğer araçlarla birlikte daha yüksek egzoz emisyonu seviyeleri oluşacaktır. Benzer şekilde, toplu taşıma araçlarının modern ve ekolojik açıdan çevre dostu, havalandırma sistemlerinin iyileştirilmesi ve alternatif yakıtların tercih edilmesi ve yoğun trafiğin olduğu karayollarından uzakta alternatif güzergahların geliştirilmesi şehirlerdeki toplu taşıma araçlarından yayılan kirliliği de azaltacaktır (Zuurbier vd., 2010).

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma 115Y263 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Adams, H., Nieuwenhuijsen, M.J., Colville, R., Older, M., Kendall, M., 2002. Assessment of road users' elemental carbon personal exposure levels, London, UK. Atmos Environ, 36: 5335–5342.
- Adar, S.D., Gold, D.R., Coull, B.A., Schwartz, J., Stone, P.H., Suh, H.H., 2007. Focused exposures to airborne traffic particles and heart rate variability in the elderly. Epidemiology, 18:95-103.
- Briggs, D.J., de Hoogh, K., Morris, C., Gulliver, J., 2008. Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution. Environ Int., 34(1):12–22.

- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., vd., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118 (11), 5380–5552.
- Cattaneo, A., Garramone, G., Taronna, M., Peruzzo, C., Cavallo, D.M., 2009. Personal exposure to airborne ultrafine particles in the urban area of Milan. *J Phys Conf Ser.*, 151:012039.
- de Nazelle, A, Fruin S, Westerdahl D, Martinez D, Ripoll A, Kubesch N, Nieuwenhuijsen M. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmos Environ* 2012; 59: 151–159.
- Diapouli, E., Grivas, G., Chaloulakou, A., Spyrellis, N., 2008. PM<sub>10</sub> and ultrafine particles counts in vehicle and On-road in the Athens area. *Water Air Soil Pollut Focus*, 8(1):89–97.
- Dons, E., Int Panis, L., Van Poppel, M., Theunis, J., Willems, H., Torfs, R., vd., 2011. Impact of time–activity patterns on personal exposure to black carbon. *Atmos Environ.*, 45:3594–602.
- Dons, E., Int Panis, L., Van Poppel, M., Theunis, J., Wets, G., 2012. Personal exposure to black carbon in transport microenvironments. *Atmos Environ.*, 55:392–8.
- Dons, E., Temmerman, P., Van Poppel, M., Bellemans, T., Wets, G., Panis, L.I., 2013. Street characteristics and traffic factors determining road users' exposure to black carbon. *Sci. Total Environ.* 447, 72–79.
- EPA, 2010. Report to Congress on Black Carbon.
- Fann, N., Lamson, A., Anenberg, S., Wesson, K., Risley, D., Hubbell, B., 2012. Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> and ozone. *Risk Anal.*, 32 (1), 81–95. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01630.x>.
- Gan, W.Q., Koehoorn, M., Davies, H.W., Demers, P., Tamburic, L., Brauer, M., 2011. Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of coronary heart disease hospitalization and mortality. *Environ Health Perspect*, 119:501–7.
- Geiss, O., Barrero-Moreno, J., Tirendi, S., Kotzias, D., 2010. Exposure to particulate matter in vehicle cabins of private cars. *Aerosol Air Qual Res.*, 10:581–8.
- Int Panis, L., de Geus, B., Vandebulcke, G., Willems, H., Degraeuwe, B., Bleux, N., Mishra, V., Thomas, I., Meeusen, R., 2010. Exposure to particulate matter in traffic: a comparison of cyclists and car passengers. *Atmospheric Environment*, 44, 2263-2270.

- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N., 2007. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmos Environ.*, 41:4781–810.
- Kirchstetter, T.W., 2007. Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods. *Atmos. Environ.*, 41, 1874-1888.
- Lin, W., Huang, W., Zhu, T., Hu, M., Brunekreef, B., Zhang, Y., vd., 2011. Acute respiratory inflammation in children and black carbon in ambient air before and during the 2008 Beijing Olympics. *Environ Health Perspect*, 119:1507–12.
- Li, B., Lei, X.N, Xiu, G.L., Gao, C.Y., Gao, S., Qian, N.S., 2015. Personal exposure to black carbon during commuting in peak and off -peak hours in Shanghai. *Sci Total Environ.*, 524–525: 237–45.
- McCracken., J, Baccarelli, A., Hoxha, M., Dioni, L., Melly, S., Coull, B.A., vd., 2010. Annual ambient black carbon associated with shorter telomeres in elderly men: Veterans Affairs Normative Aging Study. *Environ Health Perspect*, 118:1564–70.
- McNabola, A., Broderick, B.M., Gill, L.W., 2008. Relative exposure to fine particulate matter and VOCs between transport microenvironments in Dublin: personal exposure and uptake. *Atmospheric Environment*, 42, 6496-6512.
- Moreno, T., Reche, C., Rivas, I., Minguillon, M.C., Martins, V., Vargas, C., Buonanno, G., Parga, J., Pandolfi, M., Brines, M., Ealo, M., Fonseca, A.S., Amato, F., Sosa, G., vd., 2015. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona *Environ Res.*,142: 495–510.
- O’Donoghue, R.T., Gill, L.W., McKeivitt, R.J., Broderick, B., 2007. Exposure to hydrocarbon concentrations while commuting or exercising in Dublin. *Environment International*, 33, 1-8.
- Patel, M.M., Chillrud, S.N., Correa, J.C., Hazi, Y., Feinberg, M., Deepti, K.C., vd., 2010. Traffic-related particulate matter and acute respiratory symptoms among New York City area adolescents. *Environ Health Perspect*, 118:1338–43.
- Rank, J., Folke, J., Jespersen, P.H., 2001. Differences in cyclists and car drivers exposure to air pollution from traffic in the city of Copenhagen. *Sci Total Environ.*, 279:131–136.
- Rivas, I., Kumar, P., Hagen-Zanker, A., Andrade, F.M., Slovic, D.A., Pritchard, P.J., Geurs, T.K., 2017. Determinants of black carbon, particle mass and number concentrations in London transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 161: 247-262.



VII. ULUSAL HAVA KİRLİLİĞİ VE KONTROLÜ SEMPOZYUMU  
Hava Kirlenmesi Araştırmaları ve Denetimi Türk Milli Komitesi  
Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü  
1-3 Kasım 2017-Antalya



- Rodes, C., Chillrud, S., Haskell, W., Intille, S., Albinali, F., Rosenberger, M., 2012. Predicting adult pulmonary ventilation volume and wearing compliance by on-board accelerometry during personal level exposure assessments. *Atmos. Environ.* 57, 126–137.
- Zuurbier, M., Hoek, G., Oldenwening, M., Lenters, V., Meliefste, K., van den Hazel, P., Brunekreef, B., 2010. Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route. *Environmental Health Perspectives*, 118, 783–789.
- Wang, X., Westerdahl, D., Wu, Y., Pan, X., Zhang, K.M., 2011. On-road emission factor distributions of individual diesel vehicles in and around Beijing, China. *Atmos. Environ.*, 45, 503–513.
- Wellenius, G.A., Burger, M.R., Coull, B.A., Schwartz, J., Suh, H.H., Koutrakis, P., vd., 2012. Ambient air pollution and the risk of acute ischemic stroke. *Arch Intern Med*, 172: 229–34.
- Williams, R.D., Knibbs, L.D., 2016. Daily personal exposure to black carbon: a pilot study. *Atmos Environ.*, 132: 296–99.